

doi:10.3799/dqkx.2014.024

新疆拜城波孜果尔东矿区侵入岩矿物学特征

尹京武¹, 闫星光¹, 朴庭贤¹, 侯凤娇¹, 陈浦浦¹, 聂潇¹, 徐海明², 王军²

1. 中国地质大学科学研究院, 北京 100083

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘要: 新疆拜城县波孜果尔东矿区侵入岩为富含铌、钽、铀、钍、稀土、锆、铷、铯、锂等有用元素的含矿岩体。通过偏光显微镜、电子探针(EPMA)分析,对拜城波孜果尔东矿区侵入岩的矿物学特征进行了详细的研究,并对岩浆形成的构造背景进行了初步探讨,这对成岩、成矿作用研究有一定参考意义。研究表明,波孜果尔东矿区侵入岩为黑云母碱性花岗岩,主要造岩矿物包括石英、钠长石、钾长石、钠铁闪石、锂云母和黑云母等。其中,黑云母为锂铁叶云母,以富 Si 富 Fe、低 Al 贫 Mg 为特征;锂云母以富 Si、高 Li 低 Al 为特征,它们为黑云母—锂铁云母系列的不同成员,均属三八面体型。钠铁闪石以富含 Fe²⁺ 为特征。副矿物包括烧绿石、星叶石、氟铈矿、独居石、钍石、萤石、锆石、铌铁矿等。岩石形成于非造山的板内构造环境,且具高温、无水、低氧逸度的成岩特点。

关键词: 侵入岩;波孜果尔;东矿区;矿物学;电子探针;显微镜。

中图分类号: P575

文章编号: 1000-2383(2014)03-0251-10

收稿日期: 2013-06-11

Mineralogical Characteristics of Intrusive Rocks in Boziguoer East Mining Area, Baicheng County, Xinjiang

Yin Jingwu¹, Yan Xingguang¹, Park Junghyun¹, Hou Fengjiao¹,
Chen Pupu¹, Nie Xiao¹, Xu Haiming², Wang Jun²

1. Academy of Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The Boziguoer intrusive rocks in Baicheng County of Xinjiang are ore-bearing rocks with abundant useful elements such as Nb, Ta, U, Th, rare earth, Zr, Rb, Cs and Li etc.. A polarized light microscope and electron probe micro analysis (EPMA) is involved in detailed investigations into the mineralogical characteristics of intrusive rocks in this study. The results show that the main rock forming minerals include quartz, albite, potash feldspar, arfvedsonite characterized by rich Fe²⁺, Li-siderophyllite characterized by rich Si, Fe, low Al and poor Mg, and lepidolite characterized by rich Si, Li, low Al. Li-siderophyllite and lepidolite are minerals of trioctahedral mica group, belonging to the biotite-lepidolite series as different members. Moreover, the accessory minerals include pyrochlore, astrophyllite, fluocerite, monazite, thorite, fluorite, zircon, niobite etc. Then, the intrusive rocks are named as biotite alkaline granite. It is inferred that the magma might have been formed in an anorogenic intraplate tectonic setting in which diagenesis generally shows such characteristics as high-temperature, anhydrous nature and low oxygen fugacity.

Key words: intrusive rock; Boziguoer; east mining area; mineralogy; electron probe micro analysis (EPMA); microscopes.

0 引言

新疆拜城县波孜果尔位于塔里木盆地北缘西南天山晚古生代聚合带,波孜果尔东矿区侵入岩富含

铌、钽、铀、钍、稀土、锆、铷、铯、锂等元素,岩体位于新疆维吾尔自治区拜城县以正北约 43 m(图 1),侵入岩岩体本身就是含矿岩体。由于交通极为不便,矿区地质研究工作程度较低。1959年以后新疆地质局

基金项目:中国地质科学院矿产资源研究所委托项目(No. 3-4-2011-166-A)。

作者简介:尹京武(1958—),副教授,从事矿床学及矿床地球化学方面研究工作。E-mail: Yinjw@cugb.edu.cn

对地层、侵入岩、变质岩、构造、水文、地貌、矿产等进行了勘察,开展了 1:100 万、1:20 万、1:50 万地质调查和矿产评价等工作,初步查明了区域地层格架、大地构造背景、岩浆岩及区域矿产分布概况,圈定了多处综合异常区. 1991 年以后,中国地质科学院矿产资源研究所对依兰里克地区碱性岩及成矿关系和塔里木盆地北缘碱性岩带及稀土、宝玉石、金刚石成矿条件(邹天人等,2002;邹天人和李庆昌,2004),和塔里木北缘及邻区海西期碱性岩岩石化学特征及其大地构造(陈富文等,2002),以及碱性岩及其有关的成矿作用(刘楚雄等,2004)进行了初步研究工作,在区内碱性岩及其有关的成矿作用方面取得了初步的成果. 随后徐海明等(2009)开展“新疆拜城县波孜果尔铌、钽矿地质详查”工作,首次在新疆拜城县波孜果尔发现了一座特大型稀有金属铌钽矿床,基本查明了波孜果尔碱性花岗岩含矿岩体的规模、产状、品位、时空分布特征以及与铌、钽矿化的关系. 邵兴坤等(2011)对碱性花岗岩中产出的烧绿石进行了研究. 现今对于波孜果尔侵入岩体的成岩、成矿作用的细致研究尚鲜有报道;然而,成矿岩石矿物学特征的研究,对深入研究岩石、矿床成因和有用元素赋存状态等至关重要. 新疆拜城县波孜果尔碱性

花岗岩类分为东西 2 个矿区(岩体),刘春花等(2012)对西矿区花岗岩的矿物学特征进行了研究. 本文旨在探讨新疆拜城县波孜果尔东矿区岩体地质及侵入岩的矿物学特征等问题.

1 区域地质背景

波孜果尔区内地层属天山地层区、南天山分区,哈里克套小区. 区内出露的地层主要为古生代志留纪穷库什太组(S_3q)、石炭纪干草湖组(C_1g)和二叠纪小提坎里克组(P_{1x}).

区内火山岩较为发育,火山活动大致可分为晚志留世旋回、早石炭世旋回和早二叠世旋回 3 个旋回(徐海明等,2009). 区内的侵入岩不甚发育,仅在区域中部的波孜果尔发育海西晚期的碱性花岗岩体,为 A 型花岗岩,该岩体(图 1)为小岩株,呈近东西向展布,东西长约 4.45 km,南北宽 0.4~1.2 km(平均约 0.8 km 左右),面积约 3.56 km²,岩体长轴走向 295°,倾角向外倾 70°左右. 该岩体主要侵入志留纪穷库什太组的大理岩中,与区内的铌、钽矿床成矿关系极为密切. 它不仅铌、钽元素含量高,而且铀、

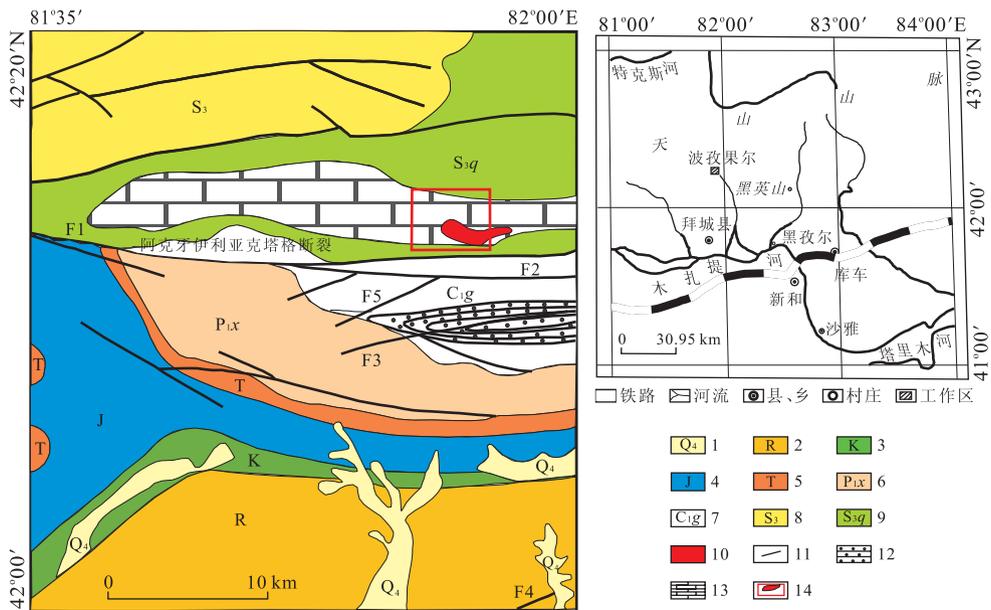


图 1 新疆拜城波孜果尔区域地质图(据李向东等,2004)

Fig. 1 Regional geological map of Boziguoer, Baicheng, Xinjiang

1. 第四系洪积层;
2. 第三系砾岩、砂砾岩、砂岩、泥岩;
3. 白垩系砂质泥岩、粉砂岩、长英质砂岩、砾岩;
4. 侏罗系泥岩、泥质粉砂岩、泥质页岩、泥灰岩、砂岩、碳质页岩、石英砂岩、粉砂岩、砾岩、粗砂岩、煤层;
5. 三叠系砾岩、中粒砂岩、泥质粉砂岩夹粗砂岩、细砾岩;
6. 二叠系小提坎立克组酸性熔岩、凝灰岩及碎屑岩建造;
7. 石炭系干草湖组浅—滨海相碳酸盐及碎屑岩建造;
8. 志留系大理岩、灰岩、石英片岩、混合岩、变质粉砂岩;
9. 志留系穷库什太组片理化泥质粉砂岩、大理岩、结晶灰岩、绢云母石英片岩、安山玢岩、辉绿岩、英安斑岩;
10. 华力西晚期碱性花岗岩;
11. 断层;
12. 砾岩;
13. 大理岩;
14. 研究区

钍、稀土、锆、铷等元素含量也较高,为一含矿岩体。

区内发育2个小型褶皱。褶皱①是位于F1断层南侧的小型背斜,背斜轴呈近东西向展布,轴面倾角近于直立,规模16 km以上,南翼地层倾向南,倾角70°左右,北翼地层倾向北,倾角40°~70°不等。褶皱②是位于F3和F4断层之间的小型背斜,背斜轴呈北东东至南西西向展布,倾向南,倾角75°~80°,规模大于12 km,南翼倾向170°~180°,倾角30°左右,北翼倾向350°~360°,倾角50°左右。

近东西向的F1和F2断裂(阿克牙伊利亚克塔格断裂)为区内的主要断裂,长160 km以上,断层面产状倾向北,倾角70°左右,为压性断层,有多期次活动的特点,沿断裂带断续分布较多的构造破碎岩,并形成较多的绿泥石化、褐铁矿化等蚀变现象。北东东—南西西向F3和F4断裂主要分布于区内南侧一带,规模较小,沿断层带断续分布较多的构造破碎岩,断层面倾向北,倾角60°左右,为压扭性断层。北东—南西向F5断裂一般为F1、F2主干断裂的次级断裂,规模较小,断层平直,断层破碎带不发育,为压扭性断层。

2 实验材料、分析方法及采样位置

2.1 拜城县波孜果尔东矿区侵入岩岩体特征

新疆拜城县波孜果尔侵入岩岩体呈近东西向顺

层侵位于志留纪大理岩中,岩体周围出露F1、F2和F3三个断层(图2)。以F2断层为界可分为东西2个碱性岩岩体。西矿区为A型花岗岩,岩性为黑云母碱性长石正长岩—霓石钠闪石碱性长石正长岩—霓石钠闪碱性长石花岗岩(刘春花等,2012)与东矿区黑云母碱性花岗岩。F1断层发育在南部,为逆断层,切穿了志留系穷库什太组大理岩,断层带宽40~90 m。F2断层发育在西部A型花岗岩和东部黑云母碱性花岗岩接触带上,为张性断层。F3断层发育在西部,为逆断层,该断层切穿了志留系穷库什太组大理岩、东部黑云母碱性花岗岩,断层带宽10~15 m。在接触带附近见有黑云母碱性花岗岩呈细脉状穿切西矿区的A型花岗岩,说明西矿区A型花岗岩类与黑云母碱性花岗岩二者呈侵入接触,属同期不同次的产物,且后者晚于前者。两岩体均呈小岩株产出,展布方向近东西。岩株出露宽0.40~1.00 km,长4.45 km,(平均约0.80 km左右),出露面积约3.56 km²。岩株由西侧的A型花岗岩(出露面积约1.20 km²)和东侧的黑云母碱性花岗岩(出露面积约2.36 km²)组成。西侧A型花岗岩岩株走向北西西,倾向NNE,倾角70°左右。东矿区黑云母碱性花岗岩体呈不规则长条状分布于矿区东部,西延与A型花岗岩类相接,岩体走向近东西,倾向北,倾角60°~70°。

岩体的围岩常发生绿帘石化、绿泥石化及萤石

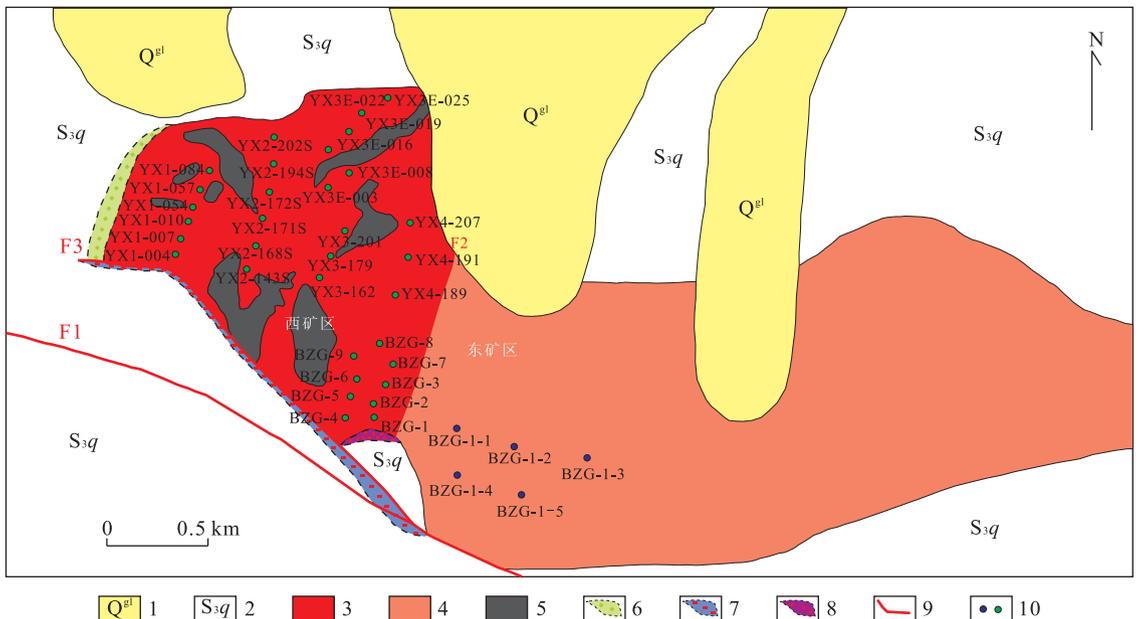


图2 新疆拜城县波孜果尔地质图(据徐海明等,2009)

Fig. 2 Geolocal map of the Boziguoer, Baicheng Xinjiang

1. 第四纪冰碛物大理岩;2. 晚志留大理岩;3. A型花岗岩;4. 黑云母碱性花岗岩;5. 大理岩捕掳体;7. 断层;8. 采样位置;9. 断层;10. 采样位置

化。绿帘石呈细粒状或隐晶质,集合体呈细脉状或薄膜状分布,常与绿泥石共生,并伴有绢云母、碳酸盐等矿物。绿泥石呈片状、纤维状集合体分布。萤石多呈紫色、黑紫色、黑色等,他形粒状、团块状或粗细不等的脉状,沿裂隙交代充填,为热液作用晚期的产物。

2.2 样品采集及分析方法

本次研究样品的采集对象,主要是东矿区与成矿作用有密切联系的侵入岩岩体,采样地点如图 2。电子探针测试在中国地质大学(北京)电子探针室完成,仪器型号为日本岛津 EPMA-1600 型电子探针仪,测试电压为 15 kV,电流为 1×10^{-7} mA,束斑为 $1 \mu\text{m}$,根据电子探针国标,主量元素测试允许的相对误差 $\leq 5\%$ 。标准样品为 Si、Al、Na(钠长石)、Ti(金红石)、Fe(铁铝榴石)、Mn(蔷薇辉石)、Ca(方解石)、K(透长石)、Rb(铯榴石),标准样品为美国 SPI 公司研制的电子探针标准物质。

2.3 岩石学特征

根据国际地科联(IUGS)火成岩分类学分会(Streckeisen, 1973; Le Maitre, 1989)所推荐的定量矿物成分分类、里特曼指数 σ 及 AR-SiO₂ 图解,即 Q-A-P 图进行投图。拜城波孜果尔东矿区过碱质碱性花岗岩类岩的所有样品均落入碱性区域(原始数据另文发表)。因此,拜城波孜果尔东矿区花岗岩体应属于碱性岩岩体,可定名为黑云母碱性花岗岩。岩石学特征如下:岩石呈灰白—浅灰色(图 3),中—粗粒花岗结构,块状构造。岩石含钠长石(28%~50%)、钾长石(30%~45%)、石英(10%~12%)、黑云母(8%~10%)、钠铁闪石(1%~3%)、锂云母(1%~2%)及少量的烧绿石、星叶石、氟铈矿、独居石、钍石、萤石、锆石、铌铁矿。



图 3 岩石手标本照片

Fig. 3 Photograph of hand sample of rocks

3 造岩矿物的矿物学特征

(1)钾长石:钾长石是拜城波孜果尔东矿区黑云母碱性花岗岩中主要造岩矿物之一,有正长石、微斜长石和条纹长石 3 种。正长石(Orthoclase)呈负低突起,干涉色一级灰—灰白。微长石(Microcline)(图 4a)呈半自形—他形粒状,解理夹角近 90° ,白色,薄片无色,负低突起,干涉色一级灰—灰白,格子状双晶发育。条纹长石(Perthite)中钾长石为主晶,钠长石为客晶,为正条纹斜长石。钾长石中 K₂O 含量在 15.4%~16.39%(表 1),Na₂O 含量在 0.20%~0.59%,CaO 含量在 0.01%~0.15%,Rb₂O 含量在 0.10%~0.21%。与烧绿石、铌铁矿及星叶石等含铌钽矿物共生(图 5)。

(2)钠长石:本矿区黑云母碱性花岗岩中钠长石呈短柱状,半自形。聚片双晶或卡钠复合双晶呈灰白色,表面混浊,负低突起,斜消光,粒径 0.7 mm 左右,含量在 28%~50%左右。与钾长石、石英、黑云母、钍石、锆石、萤石、独居石等共生(图 4a)。钠长石

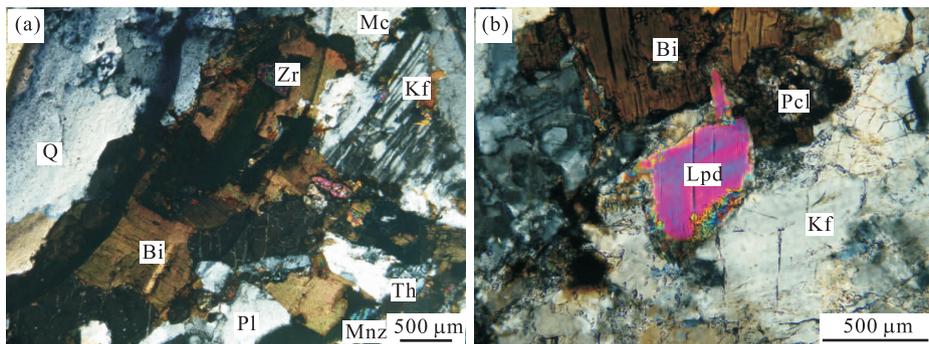


图 4 碱性岩正交偏光显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of alkali rocks (crossed nicols)

Q. 石英; Bi. 黑云母; Zr. 锆石; Mnz. 独居石; Th. 钍石; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Mc. 微斜长石; Lpd. 锂白云母; Pcl. 烧绿石

表 1 黑云母碱性花岗岩中钾长石的电子探针分析结果 (%)

Table 1 Electron microprobe analysis of feldspar in biotite alkaline granite (%)

| 样号 | BZG-I-1 | BZG-I-1 | BZG-I-1 | BZG-I-2 | BZG-I-2 | BZG-I-2 | BZG-I-3 | BZG-I-3 | BZG-I-3 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 点号 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| SiO ₂ | 65.28 | 65.03 | 64.84 | 65.18 | 65.60 | 65.74 | 64.56 | 64.72 | 64.64 |
| TiO ₂ | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Al ₂ O ₃ | 18.48 | 17.95 | 18.29 | 16.76 | 17.03 | 17.28 | 18.25 | 17.93 | 18.10 |
| FeO ^T | 0.05 | — | — | 0.37 | 0.23 | 0.13 | — | — | 0.02 |
| MnO | — | — | — | 0.01 | 0.01 | — | 0.02 | 0.08 | — |
| MgO | — | 0.06 | 0.03 | — | — | — | 0.13 | — | 0.07 |
| CaO | 0.13 | 0.08 | 0.03 | 0.07 | 0.01 | — | 0.15 | — | 0.09 |
| Na ₂ O | 0.35 | 0.25 | 0.39 | 0.59 | 0.48 | 0.50 | 0.33 | 0.22 | 0.20 |
| K ₂ O | 15.34 | 16.36 | 16.24 | 16.39 | 16.34 | 15.74 | 15.94 | 16.11 | 16.04 |
| Rb ₂ O | 0.17 | 0.13 | 0.15 | 0.21 | 0.15 | 0.11 | 0.10 | 0.18 | 0.15 |
| Total | 99.81 | 99.88 | 99.98 | 99.59 | 99.86 | 99.51 | 99.51 | 99.26 | 99.33 |
| An | 0.68 | 0.40 | 0.15 | 0.34 | 0.05 | 0.00 | 0.76 | 0.00 | 0.46 |
| Ab | 3.33 | 2.26 | 3.52 | 5.17 | 4.27 | 4.61 | 3.03 | 2.03 | 1.85 |
| Or | 95.99 | 97.34 | 96.33 | 94.49 | 95.68 | 95.39 | 96.21 | 97.97 | 97.69 |

注:据路远发(2004)GeoKit 软件计算;“—”表示元素含量在电子探针的检测线之下,未检测出元素含量,下同。

的 SiO₂ 含量在 67.89%~68.79% 之间,平均值为 68.30%,Na₂O 含量在 11.37%~12.88%,平均值为 12.20%,Al₂O₃ 含量在 18.83%~19.24% 之间,平均值为 19.00%(表 2)。与烧绿石、铌铁矿及星叶石等含铌矿物共生(图 5)。

(3)黑云母:本矿区黑云母碱性花岗岩中黑云母呈片状,褐红色,多色性极强,团簇状分布,与锂云母、钾长石、石英、钠长石共生(图 4a,4b)。电子探针成分表 3 显示黑云母中 SiO₂ 含量在 35.84%~38.26% 之间,FeO^T 含量在 35.43%~38.86%,Al₂O₃ 含量在 7.52%~11.90% 之间,平均值为 9.44%。K₂O 含量在 8.38%~11.24%。TiO₂ 含量在 1.15%~2.05%。Rb₂O 含量在 0.21%~0.49%。由此说明该黑云母富 Fe、贫 Mg、低 Al 的特征。黑云母 Rb 的平均含量明显低于锂云母中 Rb 的平均含量。另外,LA-ICP-MS 微量元素分析数据显示该黑

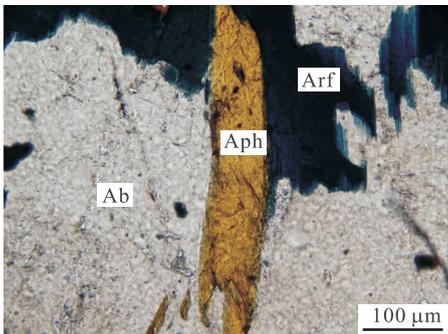


图 5 碱性岩显微照片

Fig. 5 Photomicrograph of alkali rocks

Ab. 钠长石; Aph. 星叶石; Arf. 钠铁闪石

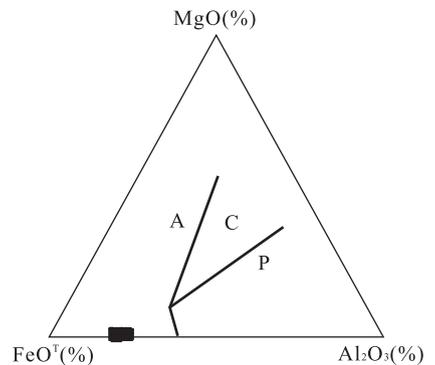


图 6 黑云母 FeO^T-MgO-Al₂O₃ (据 Abdel-Rahman, 1994)

Fig. 6 FeO^T-MgO-Al₂O₃ diagram of biotite

A. 非造山带碱性花岗岩中的黑云母所在区; P. 过铝性花岗岩(包括 S 型)中黑云母所在区; C. 造山带钙碱性花岗岩中黑云母所在区

云母中 Li 含量低。

(4)钠铁闪石:本矿区黑云母碱性花岗岩中钠铁闪石为主要铁镁矿物。钠铁闪石呈半自形板状,多色性明显,呈蓝色至褐绿色,正高突起,干涉色一级灰至黄,斜消光,负延性。沿(100)双晶结合面具简单双晶和聚片双晶。部分颗粒可见近 56°解理,与石英、钠长石、钾长石、锆石、星叶石、烧绿石共生(图 6)。

本矿区黑云母碱性花岗岩中钠铁闪石的 SiO₂ 含量在 52.10%~53.12% 之间,平均值为 52.54%,K₂O 含量在 1.52%~2.45%,平均值为 1.96%,Al₂O₃ 含量在 1.23%~1.86% 之间,平均值为 1.23%,FeO^T 含量在 31.04%~34.26% 之间,平均值为 32.29%(表 4)。黑云母碱性花岗岩中钠铁闪石以富 Si 富 Fe、贫 Al 低 Mg 为特征。

表 2 黑云母碱性花岗岩中钠长石的电子探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analysis of albite in biotite alkaline granite (%)

| 样号 | BZG-I-1 | BZG-I-1 | BZG-I-1 | BZG-I-2 | BZG-I-2 | BZG-I-2 | BZG-I-3 | BZG-I-3 | BZG-I-3 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 点号 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| SiO ₂ | 68.12 | 68.40 | 67.92 | 68.34 | 68.61 | 67.89 | 68.79 | 68.27 | 68.36 |
| TiO ₂ | 0.01 | — | — | — | 0.01 | — | — | 0.09 | 0.09 |
| Al ₂ O ₃ | 19.21 | 18.92 | 19.22 | 18.94 | 18.88 | 18.83 | 18.93 | 18.88 | 19.02 |
| FeO ^T | 0.20 | 0.38 | 0.13 | 0.27 | 0.52 | 0.50 | 0.60 | 0.05 | 0.20 |
| MnO | 0.03 | — | — | — | — | — | — | 0.10 | — |
| MgO | — | — | — | 0.04 | — | — | 0.01 | — | 0.01 |
| CaO | 0.05 | 0.04 | 0.30 | 0.05 | — | — | 0.11 | 0.01 | — |
| Na ₂ O | 11.65 | 12.88 | 12.61 | 11.37 | 11.63 | 11.89 | 12.51 | 12.66 | 12.65 |
| K ₂ O | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | — | — | 0.10 | — |
| Total | 99.27 | 99.64 | 100.21 | 99.02 | 99.68 | 99.11 | 100.95 | 100.15 | 100.33 |
| An | 0.24 | 0.17 | 1.30 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.48 | 0.04 | 0.00 |
| Ab | 99.71 | 99.73 | 98.60 | 99.64 | 99.83 | 100.00 | 99.52 | 99.44 | 100.00 |
| Or | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.00 |

注:据路远发(2004)GeoKit 软件计算.

表 3 黑云母碱性花岗岩中黑云母的电子探针分析结果(%)

Table 3 Electron microprobe analysis of biotite in biotite alkaline granite (%)

| 样号 | BZG-I-1 | | | | BZG-I-2 | | | | BZG-I-3 | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | Ave | 1 | 2 | 3 | Ave | 1 | 2 | 3 | Ave |
| SiO ₂ | 35.84 | 37.36 | 36.43 | 36.54 | 38.26 | 37.98 | 37.58 | 37.94 | 36.82 | 36.09 | 36.68 | 36.53 |
| TiO ₂ | 0.15 | 1.46 | 1.31 | 0.97 | 1.19 | 1.38 | 1.67 | 1.41 | 1.23 | 1.95 | 2.05 | 1.74 |
| Al ₂ O ₃ | 9.63 | 8.95 | 9.15 | 9.24 | 8.61 | 8.66 | 8.38 | 8.55 | 11.24 | 10.47 | 10.66 | 10.79 |
| FeO ^T | 38.86 | 35.98 | 36.87 | 37.24 | 35.92 | 36.44 | 35.43 | 35.93 | 37.28 | 36.25 | 36.39 | 36.64 |
| MnO | 1.15 | 0.84 | 0.90 | 0.96 | 1.31 | 1.15 | 1.14 | 1.20 | 0.43 | 0.51 | 0.34 | 0.43 |
| MgO | 0.07 | 0.32 | 0.19 | 0.19 | 0.42 | 0.28 | 0.36 | 0.35 | 0.23 | 0.31 | 0.19 | 0.24 |
| CaO | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.08 | 0.05 | 0.10 | 0.08 |
| Na ₂ O | 0.87 | 0.62 | 0.79 | 0.76 | 0.83 | 0.84 | 0.70 | 0.79 | 0.46 | 0.19 | 0.30 | 0.32 |
| K ₂ O | 8.47 | 8.91 | 8.51 | 8.63 | 8.81 | 9.11 | 8.89 | 8.94 | 8.37 | 8.67 | 8.82 | 8.62 |
| Rb ₂ O | 0.21 | 0.33 | 0.31 | 0.28 | 0.43 | 0.32 | 0.38 | 0.38 | 0.49 | 0.22 | 0.39 | 0.37 |
| Total | 95.28 | 94.81 | 94.48 | 94.86 | 95.79 | 96.17 | 94.56 | 95.51 | 96.63 | 94.71 | 95.92 | 95.75 |
| Si | 3.06 | 3.15 | 3.10 | 3.10 | 3.19 | 3.16 | 3.17 | 3.17 | 3.04 | 3.04 | 3.04 | 3.04 |
| Al _{IV} | 0.94 | 0.85 | 0.90 | 0.90 | 0.81 | 0.84 | 0.83 | 0.83 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 |
| Al _{VI} | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.13 | 0.07 | 0.09 | 0.10 |
| Ti | 0.01 | 0.09 | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.09 | 0.08 | 0.12 | 0.13 | 0.11 |
| Fe ³⁺ | 0.01 | 0.14 | 0.10 | 0.08 | 0.13 | 0.11 | 0.14 | 0.13 | 0.16 | 0.19 | 0.18 | 0.18 |
| Fe ²⁺ | 2.77 | 2.40 | 2.53 | 2.57 | 2.38 | 2.43 | 2.36 | 2.39 | 2.42 | 2.36 | 2.34 | 2.37 |
| Mn | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.03 |
| Mg | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.03 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| Na | 0.14 | 0.10 | 0.13 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.11 | 0.13 | 0.07 | 0.03 | 0.05 | 0.05 |
| K | 0.94 | 0.99 | 0.96 | 0.96 | 0.98 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.93 | 0.95 | 0.97 | 0.95 |
| Li* | | | | 0.52 | | | | 0.52 | | | | 0.52 |
| Total | 7.99 | 7.86 | 7.90 | 7.92 | 7.87 | 7.89 | 7.86 | 7.87 | 7.84 | 7.81 | 7.82 | 7.82 |

注:据路远发(2004)GeoKit 软件计算;“*”表示数据由 LA-ICP-MS 分析测得数据.

(5) 锂云母:本矿区黑云母碱性花岗岩中锂云母呈片状,无色,干涉色鲜艳,近于平行消光,正延性,具一组极完全解理,含量为 1%~3%. 主要与黑云母、石英、斜长石、钾长石及含铈钽矿物烧绿石、铈铁矿、星叶石共生(图 4b),东矿区黑云母碱性花岗岩

锂云母中 SiO₂ 含量在 52.48%~53.30% 之间, Al₂O₃ 含量变化不大,平均值为 12.72%. FeO^T 含量在 2.60%~2.98%,平均值为 3.42%. Rb₂O 含量在 0.44%~0.51%,平均值为 0.47%(表 5). 数据显示,该锂云母具有低 Al 的特征, Al₂O₃ 含量明显较

表 4 黑云母碱性花岗岩中钠铁闪石的电子探针分析结果(%)

Table 4 Electron microprobe analysis of arfvedsonite in biotite alkaline granite (%)

| 样号 点号 | BZG-I-1 | | | BZG-I-2 | | | BZG-I-3 | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| SiO ₂ | 52.66 | 53.12 | 52.10 | 52.38 | 52.15 | 52.69 | 52.55 | 52.80 | 52.39 |
| TiO ₂ | 0.22 | 0.13 | 0.05 | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.27 | 0.13 | 0.11 |
| Al ₂ O ₃ | 0.95 | 0.89 | 1.12 | 1.19 | 1.22 | 1.33 | 1.22 | 1.26 | 1.86 |
| FeO ^T | 34.26 | 33.85 | 33.58 | 31.04 | 31.14 | 31.44 | 31.69 | 31.82 | 31.77 |
| MnO | 0.12 | 0.51 | 1.22 | 0.84 | 0.82 | 0.85 | 0.77 | 0.77 | 0.75 |
| MgO | 0.01 | — | — | 0.32 | 0.33 | 0.22 | 0.27 | 0.24 | 0.27 |
| CaO | 0.13 | 0.25 | 1.06 | 0.11 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | — | 0.06 |
| Na ₂ O | 8.72 | 7.68 | 7.52 | 9.21 | 8.78 | 9.31 | 9.19 | 9.02 | 8.65 |
| K ₂ O | 1.52 | 2.45 | 1.70 | 2.09 | 2.08 | 1.83 | 1.89 | 2.08 | 2.02 |
| Total | 98.59 | 98.88 | 98.35 | 97.35 | 96.74 | 97.84 | 97.87 | 98.13 | 97.88 |
| Si _T [*] | 8.32 | 8.37 | 8.27 | 8.33 | 8.34 | 8.33 | 8.32 | 8.33 | 8.28 |
| Al _T | -0.32 | -0.37 | -0.27 | -0.33 | -0.34 | -0.33 | -0.32 | -0.33 | -0.28 |
| Al _C | 0.49 | 0.53 | 0.48 | 0.55 | 0.56 | 0.58 | 0.54 | 0.57 | 0.63 |
| Fe _C ³⁺ | 0.00 | 0.05 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ti _C | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.01 |
| Mg _C | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Fe _C ²⁺ | 4.48 | 4.41 | 4.41 | 4.13 | 4.17 | 4.16 | 4.19 | 4.20 | 4.20 |
| Mn _C | | | 0.06 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| Fe _B ²⁺ | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn _B | 0.02 | 0.07 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ca _B | 0.02 | 0.04 | 0.18 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| Na _B | 1.92 | 1.88 | 1.71 | 1.98 | 1.99 | 1.99 | 2.00 | 2.00 | 1.99 |
| Ca _A | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Na _A | 0.75 | 0.46 | 0.60 | 0.86 | 0.73 | 0.86 | 0.82 | 0.76 | 0.66 |
| K _A | 0.31 | 0.49 | 0.34 | 0.42 | 0.42 | 0.37 | 0.38 | 0.42 | 0.41 |

注：“*”表示离子在晶体中所占位置,据路远发(2004)GeoKit 软件计算。

正常白云母的低. 锂云母中普遍含有 Rb. 另外, ICP 微量元素分析数据显示该锂黑云母中 Li 含量较高.

4 讨论

顾雄飞和徐英平(1973)研究发现,花岗岩及花岗伟晶岩中钼、铌等元素的富集成矿以及其他稀有元素矿床都与含锂的云母类矿物的分布有着密切的关系. 上述数据表明, 本研究区碱性花岗岩石中, 黑云母、锂云母是重要的造岩矿物. 根据表 3 数据采用阴离子法以氧原子数为 11 计算黑云母阳离子数(表 3), 进而获得黑云母晶体化学式为 $K\{(Mg < 0.67, Fe > 0.33)_3[AlSi_3O_8](OH)_2\}$. 八面体中 6 次配位位置的阳离子 $Mg : Fe^{2+} \approx 0$, 远小于 2, $Mg^{2+}、Al^{3+}$ 被大量 Fe^{2+} 和少量 Li^+ 替代, Fe^T 高, $Mg^{2+}、Al^{3+}$ 低, 为三八面体型. 用阳离子间的关系 $Li-R_{VI}^{3+} + Ti_{VI}-R_{VI}^{2+}$ 投三角图, 所有点均落于锂铁叶云母区域(图 7). 孙世华(1988)认为锂铁叶云母是 Fe-Li 云母的矿物(或称为黑云母—锂铁云母系列)成员之一, 它是富 Fe 贫 Li 的成员.

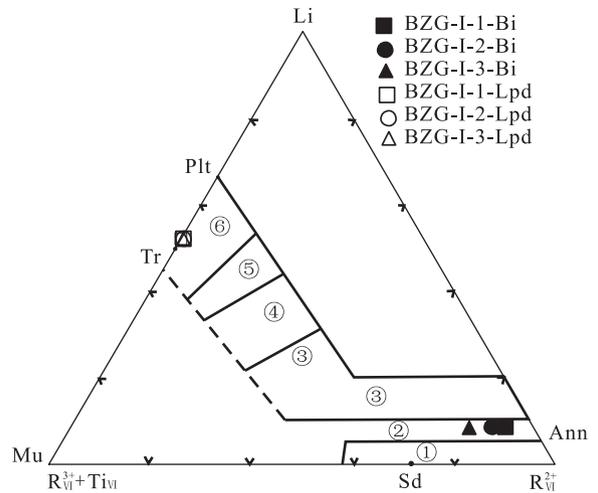


图 7 Fe-Li 云母的命名(据孙世华, 1988)

Fig. 7 Nomenclature of iron-lithium micas

Ann. 羟铁云母; Mu. 白云母; Li. 锂云母; ①富铁黑云母+铁叶云母; ②锂黑云母+锂铁叶云母; ③黑鳞云母; ④铁锂云母; ⑤绿鳞云母; ⑥锂云母

这与常丽华等(2006)提出的铁含量高的黑云母, 往往产于碱性岩的规律是一致的. 上述矿物特征

表 5 黑云母碱性花岗岩中锂云母的电子探针分析结果(%)

Table 5 Electron microprobe analysis of lepidolite in biotite alkaline granite (%)

| 样号 点号 | BZG-I-1 | | | | BZG-I-2 | | | | BZG-I-3 | | | |
|--------------------------------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | Ave | 1 | 2 | 3 | Ave | 1 | 2 | 3 | Ave |
| SiO ₂ | 53.18 | 53.00 | 53.30 | 53.16 | 53.48 | 53.88 | 53.05 | 53.47 | 53.14 | 52.67 | 54.69 | 53.50 |
| TiO ₂ | — | 0.03 | 0.10 | 0.07 | 0.18 | 0.16 | 0.19 | 0.18 | 0.21 | 0.24 | 0.10 | 0.18 |
| Al ₂ O ₃ | 12.53 | 12.73 | 12.72 | 12.66 | 12.81 | 12.81 | 12.97 | 12.86 | 12.49 | 12.74 | 12.65 | 12.63 |
| FeO ^T | 3.67 | 3.58 | 2.98 | 3.41 | 3.80 | 3.26 | 3.64 | 3.57 | 3.45 | 3.62 | 2.81 | 3.29 |
| MnO | — | — | 0.10 | 0.10 | 0.02 | — | 0.10 | 0.06 | 0.24 | 0.11 | 0.05 | 0.13 |
| MgO | — | — | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.04 | — | 0.05 | 0.07 | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| CaO | — | 0.14 | 0.06 | 0.10 | — | — | — | — | 0.02 | — | — | 0.02 |
| Na ₂ O | — | 0.19 | 0.16 | 0.18 | 0.22 | 0.28 | 0.21 | 0.24 | 0.27 | 0.30 | 0.26 | 0.28 |
| K ₂ O | 10.42 | 10.26 | 10.40 | 10.36 | 10.07 | 10.18 | 10.32 | 10.19 | 10.28 | 10.19 | 10.31 | 10.26 |
| Rb ₂ O | 0.47 | 0.45 | 0.46 | 0.46 | 0.51 | 0.50 | 0.47 | 0.49 | 0.44 | 0.46 | 0.47 | 0.46 |
| Total | 80.27 | 80.38 | 80.29 | 80.31 | 81.15 | 81.11 | 80.95 | 81.07 | 80.61 | 80.36 | 81.39 | 80.79 |
| Si | 4.22 | 4.20 | 4.22 | 4.21 | 4.20 | 4.28 | 4.18 | 4.22 | 4.21 | 4.18 | 4.25 | 4.21 |
| Al _{IV} | -0.22 | -0.20 | -0.22 | -0.21 | -0.20 | -0.22 | -0.18 | -0.20 | -0.21 | -0.18 | -0.25 | -0.21 |
| Al _{VI} | 1.40 | 1.39 | 1.41 | 1.40 | 1.38 | 1.40 | 1.39 | 1.39 | 1.37 | 1.38 | 1.41 | 1.39 |
| Ti | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Fe ³⁺ | 0.24 | 0.24 | 0.20 | 0.23 | 0.25 | 0.21 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.24 | 0.18 | 0.22 |
| Fe ²⁺ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| Mg | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| Ca | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Na | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| K | 1.10 | 1.08 | 1.10 | 1.09 | 1.06 | 1.07 | 1.09 | 1.07 | 1.08 | 1.08 | 1.07 | 1.08 |
| Li* | | | | 3.53 | | | | 3.52 | | | | 3.54 |
| Total | 6.74 | 6.76 | 6.74 | 6.75 | 6.75 | 6.74 | 6.76 | 6.75 | 6.76 | 6.77 | 6.72 | 6.75 |

注:据路远发(2004)GeoKit 软件计算;“*”表示数据由 LA-ICP-MS 分析测得数据。

可有效地区分花岗岩类形成的构造环境,将上述黑云母 MgO-FeO-Al₂O₃ 的成分组成投图,均落入非造山的碱性花岗岩区域中(图 6);东矿区黑云母碱性花岗岩中的铁质黑云母与高温、无水的非造山碱性岩系的铁黑云母成分相近,都表现富铁的特点,均属三八面体型黑云母—锂铁云母系列.进而推测黑云母碱性花岗岩岩浆也可能产于高温、无水的环境的认识与张遵忠等(2005)的研究结果基本是一致的.另外,根据不同类型岩石中的 ZrO₂/HfO₂ 比值,一般 ZrO₂/HfO₂>60 的锆石产于碱性岩(王濮等,1987),研究区产出锆石的 ZrO₂/HfO₂ 比值为 112.39,即 ZrO₂/HfO₂>60,此结果与前人研究的结果相吻合,具有碱性岩的特征(原始数据另文发表).

本矿区锂云母的化学成分数据表 5 显示 Li、Si 含量较高,Al 含量明显较正常白云母的低,并且 FeO^T 含量亦很低,这是由于云母类矿物的八面体层中 1 价阳离子锂与其他高价阳离子发生置换,要使电价平衡必然有四面体层中的一些阳离子发生变化,即锂的增加相应地有四面体层中铝的减少和硅的增加.用阳离子间的关系 Li-Al_{VI}-R* 投三角图(孙世华,1988),所有点均落于锂云母区域(图 8).该锂

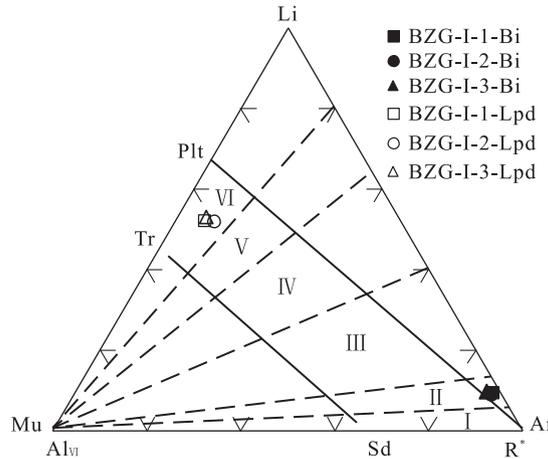


图 8 Fe-Li 云母的 Li、Al_{VI} 和 R* 的成分变化(据孙世华,1988)
Fig. 8 A plot showing compositional changes of Li, Al_{VI} and R* in Fe-Li micas

Ann. 羟铁云母; Mu. 白云母; Li. 锂云母; I ~ VI 分别表示从顶角 Al_{VI} 引出的射线所划分的 6 个区的云母

云母同系 Fe-Li 云母的矿物(或称为黑云母—锂铁云母系列)成员之一,属三八面体型.但它是富 Li 贫 Fe 的成员.

花岗岩中含锂的云母类矿物的分布,与铌、钽的

矿化关系是十分密切的.一般地说,黑磷云母、铁锂云母与花岗岩中铌的矿化有关;而铝黑磷云母、锂白云母、锂云母(可能还有白云母)的分布则可以作为钽矿化的找矿标志之一.由于 Nb 易与 F 结合形成络合物位移,而含铌矿物烧绿石结构中有 F,与陈超等(2013)的研究结果相吻合.镜下观察到锂云母与含铌钽的矿物存在着一定的规律性,即锂云母出现的频度越高含铌钽矿物出现的频度越高.由此可见锂云母与铌钽矿化关系密切.由表 3 和表 5 可见,岩石中云母的主要类型为铁叶云母,铁锂云母的出现显示出岩石铝过饱和的特性,说明岩浆的源区可能为一套富硅富铝、贫钛低镁的物质.

本研究采用阴离子法以氧离子数 23 为基准计算出角闪石的阳离子系数结果见表 4,由此数据得到相应的晶体化学式,化学式为 $\text{NaNa}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$,它满足国际矿物协会角闪石命名方法,钠铁闪石的化学成分分类界限为 $\text{Na}_B \geq 1.34, (\text{Na} + \text{K})_A \geq 0.5$.结果表明,本矿区黑云母碱性花岗岩的角闪石为钠铁闪石(Arfvedsonite),是富含 Fe^{2+} 的角闪石,含少量 TiO_2 , Fe^{2+} 部分被 Mg^{2+} 置换, Na^+ 部分被 Ca^{2+} 置换.角闪石的化学组成是岩体岩浆结晶物理化学条件的标志,可利用角闪石的化学组成估算岩体岩浆结晶的温度和压力,但目前还没有适应碱性角闪石的温压计. Compton 发现角闪石中在 T 组离子中 Al 对 Si 的取代作用随温度升高而增加,从表 4 给出的碱性角闪石中 Al 和 Ti 的分析结果定性推测:富碱花岗岩体的结晶温度较高、结晶压力较低.

由表 1 可见,条纹长石的 Ab、Or 两相的组分含量均很高,可达 99,而 An 组分含量很低,几乎为零,指示其碱性程度较高.且钾长石中铷的含量最高可达 0.21%,除黑云母、锂云母外,其为含铷的矿物之一,这与邹天人等(2002)的研究结果相吻合.本矿区产出的花岗岩主要造岩矿物为钾长石、钠长石,全岩化学分析表明为碱性岩类(另文发表),这与魏红艳等(2012)、陈超等(2013)的研究结果相吻合.

5 结论

(1)拜城波孜果尔东矿区侵入岩为碱性花岗岩,岩性为黑云母碱性花岗岩.造岩矿物有钠长石、钾长石、石英、钠铁闪石、锂铁叶云母和锂云母等;副矿物有烧绿石、星叶石、氟铈矿、独居石、钍石、萤石、锆石和铌铁矿等.

(2)锂铁叶云母以富 Si 富 Fe、低 Al 贫 Mg 为特征;锂云母以高 Si、Li 低 Al 为特征.它们为黑云母—锂铁云母系列的不同成员,均属三八面体型.云母类矿物与铌钽矿化关系密切,可作为钽矿化的找矿标志.

(3)本矿区角闪石为钠铁闪石,钠铁闪石以富含 Fe^{2+} 为特征.

References

- Abdel-Rahman, F. M., 1994. Nature of Biotites from Alkaline, Calcalkaline and Peraluminous Magmas. *Journal of Petrology*, 35(2): 525—541. doi: 10. 1093/petrology/35. 2. 525
- Chang, L. H., Chen, M. Y., Jin, W., 2006. Identification Manual of Transparent Mineral Thin-Section. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, C., Lü, X. B., Cao, X. F., et al., 2013. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Late Carboniferous-Early Permian Granites in Kumishi Area, Xinjiang. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 218—232 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F. W., Li, H. Q., Lu, Y. F., 2002. Metallogenic Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Rare and Rare Earth Metal Ore Deposits in Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 565 (in Chinese).
- Gu, X. F., Xu, Y. N., 1973. Preliminary Probe of Li-Bearing Mica Minerals Originating from Southern China. *Geochimica*, 2: 61—75 (in Chinese).
- Le Maitre, R. W., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Li, X. D., Xiao, W. J., Zhou, Z. L., 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Determination on the Late Devonian Tectonic Event along the Southern Margin of the South Tianshan Mountains and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 691—696 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. H., Yin, J. W., Wu, C. L., et al., 2012. Mineralogy and Temperature of Magma Generation for A-Type Granitoids in Boziguoer, Baicheng County, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 589—602 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. X., Xu, B. L., Zou, T. R., et al., 2004. Petrochemistry and Tectonic Significance of Hercynian Alkaline Rocks along the Northern Margin of the Tarim Plat-

- form and Its Adjacent Area. *Xinjiang Geology*, 22(1): 43—49 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. F., 2004. GeoKit—A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, 33(5): 459—464 (in Chinese).
- Shao, X. K., Yin, J. W., Yang, H. T., et al., 2011. Application of EPMA to Pyrochlore Study from Baicheng Alkali Granite, Xinjiang. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 30(6): 521—526 (in Chinese with English abstract).
- Streckeisen, A. L., 1973. Classification and Nomenclature Recommended by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geotimes*, 18(10): 26—30.
- Sun, S. H., 1988. Interpretation of Chemical Composition and Subdivision of Iron-Lithium Micas. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 213—228 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Pan, Z. L., Weng, L. B., 1987. Science of System Mineral. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wei, H. Y., Sun, D. Y., Ye, S. Q., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Its Geological Significance of the Granitic Rocks in the Yichun-Hegang Region, Southeastern Xiao Hinggan Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(Suppl.): 50—59 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. M., Wang, J., Zhang, L., 2009. The Geological Report of the Nb and Ta in Boziguoer, Baicheng County, Xinjiang. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Z., Gu, L. X., Wu, C. Z., et al., 2005. Weiya Complex, Eastern Tianshan: Single-Sourced or Diverse-Sourced—Evidence from Biotite. *Geochimica*, 34(4): 328—338 (in Chinese with English abstract).
- Zou, T. R., Li, Q. C., 2004. Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China. Geological Publishing House, Beijing, 159—239 (in Chinese with English abstract).
- Zou, T. R., Xu, J., Chen, W. S., et al., 2002. Rare and Rare Earth Mineral Deposits Related to Alkaline Rocks on Northern Nargin of Tarim Basin, Xinjiang, China. *Mineral Deposits*, 21(Suppl.): 845—848 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 常丽华, 陈曼云, 金巍, 2006. 透明矿物薄片鉴定手册. 北京: 地质出版社.
- 陈超, 吕新彪, 曹晓峰, 等, 2013. 新疆库米什地区晚石炭世—早二叠世花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 38(2): 218—232.
- 陈富文, 李华芹, 路远发, 2002. 新疆稀有一稀土金属矿床成矿作用时空规律. 地质学报, 76(4): 565.
- 顾雄飞, 徐英年, 1973. 华南某地含锂的云母类矿物初步探讨. 地球化学, 2: 61—75.
- 李向东, 肖文交, 周宗良, 2004. 南天山南缘晚泥盆世构造事件的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年证据及其意义. 岩石学报, 20(3): 691—696.
- 刘春花, 尹京武, 吴才来, 等, 2012. 新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类矿物学特征及岩浆形成的温度条件. 岩石矿物学杂志, 31(4): 589—602.
- 刘楚雄, 许保良, 邹天人, 等, 2004. 塔里木北缘及邻区海西期碱性岩岩石化学特征及其大地构造意义. 新疆地质, 22(1): 43—49.
- 路远发, 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459—464.
- 邵兴坤, 尹京武, 杨海涛, 等, 2011. 电子探针在新疆拜城碱性花岗岩烧绿石研究中的应用. 电子显微学报, 30(6): 521—526.
- 孙世华, 1988. Fe-Li 母体化学成分的解释和分类. 地质科学, (3): 213—228.
- 王濮, 潘兆鲁, 翁玲宝, 1987. 系统矿物学. 北京: 地质出版社.
- 魏红艳, 孙德有, 叶松青, 等, 2012. 小兴安岭东南部伊春—鹤岗地区花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 37(增刊): 50—59.
- 徐海明, 王军, 张磊, 2009. 新疆拜城县波孜果尔铌、钽矿地质报告. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.
- 张遵忠, 顾连兴, 吴昌志, 等, 2005. 东天山尾亚杂岩体: 同源还是异源——来自黑云母的证据. 地球化学, 34(4): 328—338.
- 邹天人, 李庆昌, 2004. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京: 地质出版社, 152—239.
- 邹天人, 徐珏, 陈伟十, 等, 2002. 塔里木盆地北缘碱性岩型稀有稀土矿床. 矿床地质, 21(增刊): 845—848.